

室内飛行ロボットの設計

高久 有一* 西 仁司*

First Design of an Indoor Robotic Plane

Yuichi TAKAKU and Hitoshi NISHI

Recently, unmanned aerial vehicles (UVAs), called *Drones*, and unmanned ground vehicles (UGAs) have been developing rapidly. Acquiring knowledge of these vehicles will be very important for students of a technical college. We have designed an indoor robotic plane for the university education of information engineering departments.

Considering safety, an airplane with a 1.3-m span and a 160-g flight weight that can fly within the confines of the general gymnasium was made of soft materials, such as expanded polypropylene (EPP). This plane can fly slowly (under 3.0 m/sec), and the turning radius is 3.2 m. The payload is over 160 g—sufficient to accommodate a control microcomputer. It would be possible to learn elementary technology based on UVA.

Keywords : indoor robotic plane, indoor airplane, light model airplane, low Reynolds number, automatic flight control system

1. はじめに

ドローンと呼ばれる無人航空機や自動運転の自動車の開発が活発になっている今日、それらに関する基礎知識習得や経験を積むことは、高専の学生にとって、重要なことと思う。多くの大学や研究機関で、体育館程度の広さの室内で飛行可能なマルチコプターをはじめとする様々な飛行ロボットが開発されており、日本でもそのような技術者を育成すべく2005年度から「全日本学生室内飛行ロボットコンテスト」¹⁾を日本航空宇宙学会が毎年開催している。

飛行ロボットの多くは、これまで低レイノルズ数と考えていた人力飛行機や模型飛行機より1桁も小さい超低レイノルズ数の領域での飛行となるため、今までとは異なった空力設計が必要である。本研究では、初心者でも比較的簡単に飛ばせ、自動制御のためのワンチップマイコンを搭載可能な室内飛行ロボットとして、レイノルズ数が 10^5 程度での固定翼機の設計を行った。屋外ではなく、室内用

飛行機にしたのは、小型軽量、安価、安全であることに加え、天候に左右されないため公開講座や学生実験での利用も可能となるからである。

2. 目標とする飛行性能

本研究で設計する室内飛行機に求める条件は、以下の3つにまとめられる。

1. 一般的な体育館の広さで飛行可能であること
2. 初心者でも比較的簡単に短時間で飛ばせるようになること
3. 制御のためのマイコンを積んでも飛ばせること

一般的な体育館の大きさは、広さ20m×40m程度、高さ8m程度である。この広さで初心者が飛ばすことを考え、機速5m/sec程度、旋回半径5m程度の飛行機を目標とする。これであれば、ミスがあってもあわてずに、余裕を持って飛ばすことができるであろう。また、運動性

*電子情報工学科

能は重要でないためエルロンがないラダー機とするが、これは、軽量かつシンプルになる上、エルロンの操作が省かれ都合が良い。飛行可能時間は、一般的な室内模型飛行機と同様の5分程度を想定する。

表1. 航空機のレイノルズ数の比較

航空機の種類	機速 [m/s]	翼弦長 [m]	レイノルズ数
軽飛行機	50	1.5	5.0×10^6
人力飛行機	7.5	1.0	5.0×10^5
模型飛行機	20	0.30	4.0×10^5
室内模型飛行機	5.0	0.15	5.0×10^4

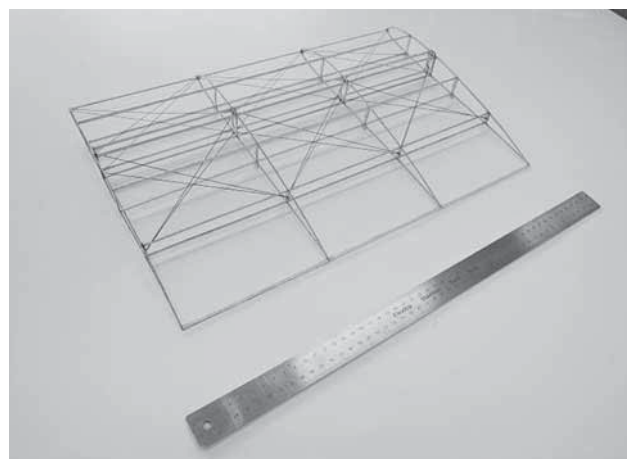
※動粘性係数は、 $\nu = 1.5 \times 10^{-5}$ (1気圧 20℃の空気) として計算

表1に示す航空機のレイノルズ数の比較を見れば分かるように、室内模型飛行機のレイノルズ数は、低いと思われる人力飛行機や模型飛行機のそれに比べてもさらに低く、揚力確保することがとても難しい。そこで、できるだけレイノルズ数を大きくするため、翼弦長を一般的な室内模型飛行機の2倍程度の0.30mにする。主翼の平面形は、翼端でのレイノルズ数低下を防ぎ、製作も容易かつ正確となる矩形翼とする。翼幅は1.3mと大き目にする事で、十分な翼面積を確保できる。

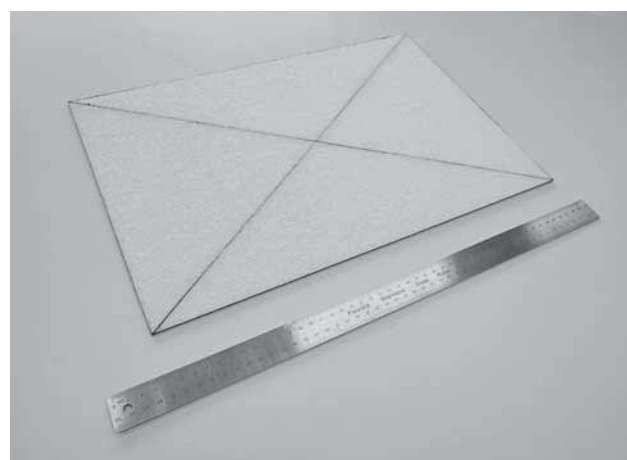
翼型は、クラークYであれば、下面の後縁側がフラットのため作りやすく、 5.0×10^4 程度の超低レイノルズ数領域でも迎角5度ほどで揚力係数が $C_L = 0.90$ 程度になり²⁾、空力的にも良いと思われる。実際に、図1(a)に示すように、バルサ材で翼型をつくり、軽量化のため肉抜きし、ねじれ強度を上げるため内側をカーボンで補強した結果、翼幅0.45m分で、重さ8g程度となった。強度や軽さは十分であり、補強をいれても主翼全体で35g程と、とても軽い。材料費だけで1万円もかかる上、衝突に脆く修理が困難であることから、板翼に変更した。必要馬力を下げ、滑空性能の上げる必要がある場合は、クラークY等の翼型を考慮するべきであろう。

板翼の場合、空力的には劣るものの、構造が簡単なので短時間で作ることができ、発泡材の1つであるEPP (expanded polypropylene) を、図2に示すようにカーボンで補強することで強度を確保できる。修理は簡単で、主翼の材料費も3000円程度で済む。但し、一般的にはこれでも十分軽いのであるが、翼幅0.45m分の主翼だけで

重さが13gほどとなり、主翼全体では補強も入れると、50g程度となる。板翼では、空気は前縁で剥離しているため、抗力は大きいものの失速特性は穏やかになり、操縦はしやすいと思われる。機速5.0m/sec、翼面積 $0.30 \times 1.3 = 0.39 \text{m}^2$ 、 $C_L = 0.50$ として揚力を計算すると300gf程度となり、機体重量が200gになっても、ペイロードが100g確保できることになる。なお、20g以下の小型モーターでもパワフルで推力が十分得られることから、抗力が大きいことは問題にならない。但し、空力モーメントが大きいため、翼端のねじれ強度の確保と、水平および垂直尾翼の面積を大きめにし、安定性を上げなければならない。よって、尾翼の静ボリュームは、一般的な室内模型飛行機に比べ1.2倍程度とした。これらの見積もりをもとに設計した飛行ロボットを図2に示す。ロール方向の安定性と、ラダーを用いた旋回が容易になるように、水平な中央翼から、左翼と右翼は26度と大きい上半角をつけている。



(a) 翼型はクラークY, 翼弦長 30cm, 翼幅 45cm 分で 8 g 程度



(b) 板翼, 翼弦長 30cm, 翼幅 45cm 分で 13g 程度

図1. 主翼の一部の試作

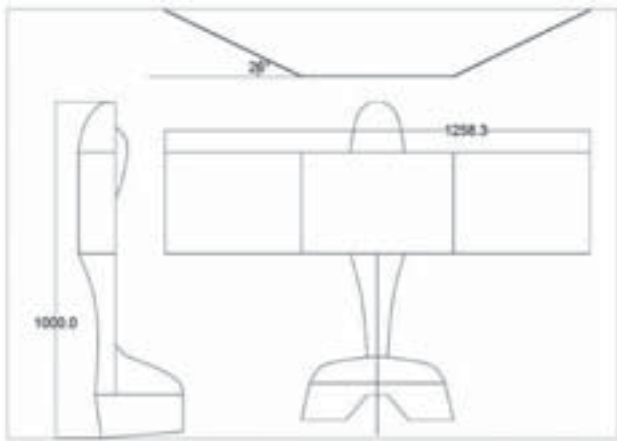


図2. 飛行ロボットの図面

表2. 目標となる飛行ロボットの諸元

翼幅	1.3m
翼面積	0.39m ²
機長	1.0m
重量	200g (バッテリー含)
ペイロード	100g
定常飛行速度	5.0m/sec
定常旋回半径	5.0m

以上より、本研究で目標とする飛行ロボットの諸元は、表2のようになった。

3. 機体の製作

機体は、図3に示すようテーブル上で、機体の下面から製作することで正確に作ることが出来る。主翼と機首部分は、弾力性の高い3mm厚45倍発砲のEPPを用い、それ以外は、剛性の高い3mm厚デプロンを用いる。これにより、機首からの衝突時のショックを吸収でき、修理も容易になる。補強は、主に太さ1mmのカーボンロッドをトラス状に組むことで行い、十分な強度と剛性が得られている。カーボンロッド以外の材料は、レーザーカッターを用いて切断しているため製作は容易で、1人が1日4時間の作業を5日間ほど、つまり20人・時間ほどで1機製作できる。各工程で接着剤を完全に硬化させるのに一晩置く必要があり、最低でも4日間はかかってしまう。

この機体に載せる電子部品類とその特徴は、表3に示す。初心者の操作で壊しやすいことを考え、必要な性能を

表3. 飛行ロボットに載せる電子部品類とその特徴

モーター	E-MAX GT2203/33 1560KV 17g ¥1,850
モーター コントローラー	HiModel ESC PROFESSIONAL-10A 9.5g ¥1,350
エレベータ サーボ	EMAX ES9251 0.08sec/60° 0.27kg/cm 3.3g ¥580
ラダーサーボ	同上

満たした上で、現在入手可能なもので最も安価なものを選んだ。なお、安価でも信頼性の低いものは使用していない。

完成した機体は、図4に示すもので、バッテリーを含まない機体重量は143gであり、軽量な2セル(7.4V)200mAhのリチウムポリマーバッテリーが17gなので、総重量は160gとなる。制御用のワンチップマイコン一式を載せても200g以下にできるため、軽量に仕上がった。

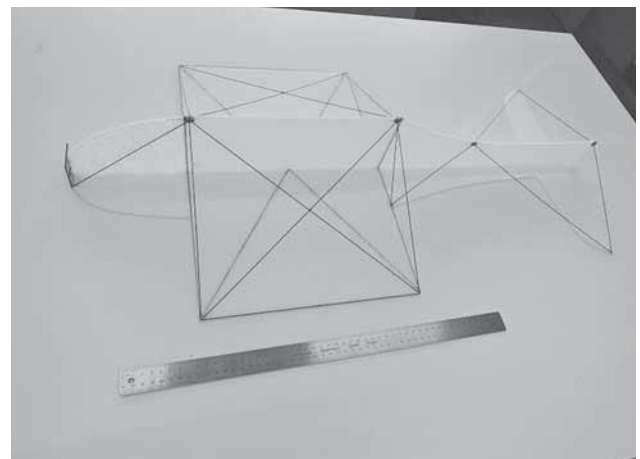


図3. 飛行ロボットの製作過程

下面を先に製作することで、簡単に強度と精度を上げることができる

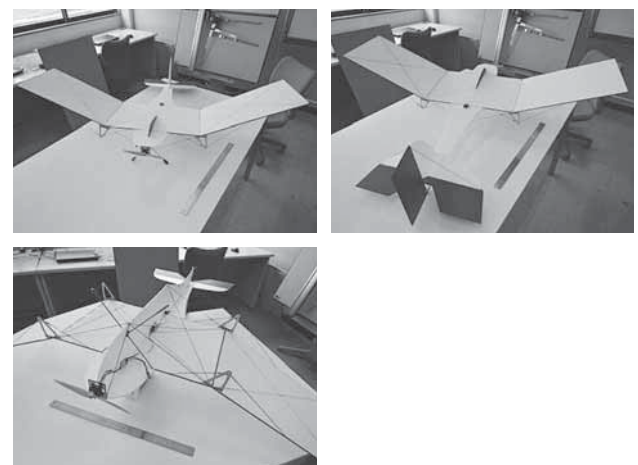


図4. 製作した機体

翼幅 1.3m、機長 1.0m、重量 143g (バッテリーは含まない)

4. 試験飛行の結果

重心位置は、主翼前縁から翼弦長の30%の位置とするが、軽量のバッテリーだと重心位置を合わせることができなかった。そこで、飛行制御用マイコンとセンサー一式が30g程度と見積もられるため、その代わりに重いバッテリーを搭載し、試験飛行を行った。2セル800mAhで45gほどであるので、総重量は、約190gとなる。この場合の飛行時間は、20分以上であった。

操縦性は、マイルドで容易であった。自立安定性が非常に高く、送信機のスティックをニュートラルにすれば、ロール方向はすぐに水平になる。ラダーでの旋回も容易で、舵を打っている間だけ旋回し、離せば直線飛行になる。ピッチング方向は、常にエレベータを操作しなければならないが、敏感でないため難しくない。モーターの取り付け角をダウンスラスト2度にしたところ、パワーをかけても頭上げがなくなり、水平のまま飛行するようになった。サイドスラストは0度のままで癖はなかった。コントロールに少し慣れれば、離陸に必要な距離は2m程度、着陸には0.5m程度で十分であることが、飛行動画から分かった。

使用したプロペラは7x3.5で、初心者がむやみにパワーをかけても安全のように本来より小さいものであり、モーターの出力を30Wに抑えているが、必要十分な推力であった。

パワー不足の場合は、プロペラを8x4.3に替えるだけで出力が50W以上となり、推力を上げることができる。

飛行調整などを一通り終えた後、定常水平飛行速度と、旋回半径の計測を行った。パイロンを10m離して設置し、その間を定常水平飛行したときにかかる時間を測定することで、その速さを計算した。何度も計測を繰り返していくと、きれいな定常水平飛行機をしたときの結果にはばらつきが少なく、それらを平均したところ、定常水平飛行速度は、2.9m/secとなった。また、旋回半径は、定常水平飛行速度程度で、高度と速さを維持し無理なく360度旋回を連続で続けているとき、円の大きさに合わせパイロンを置き、その距離から算出した。その結果、旋回半径は、3.2mであった。どちらも有効数字2ケタ程度の精度となる。これらの計測の様子は、すべて動画で記録した。この動画から、水平飛行時の迎角を見積もると、図5より約6



図5. 定常水平飛行時の迎角

機速 2.9m/sec, 迎角約 6°



図6. 定常水平 360度旋回

ほぼ定常水平飛行の速さで旋回, 旋回半径 3.2m, バンク角約 15°



図7. コブラ状態での水平飛行

機速 1.8m/sec, 迎角約 27°



図8. パワーをかけた 360度急旋回

旋回半径約 1m, バンク角約 60°

度、旋回のバンク角は、図6より約15度であることが分かる。

次にアクティブに飛ばしてみたところ、安定したコブラ状態での機速は、1.8m/secで、迎角は図7のように約27度。パワーをかけた360度急旋回では、旋回半径は約1mで、バンク角は、図8のように約60度であった。

最後にペイロード試験を行った。少しずつ重りを載せていくと、それに従い離陸に必要な距離が伸びていったが、一度浮いてしまうと操作性は重りが無い場合からさほど変化しなかった。しかし、パワーにはあまり余裕がなく、機速も速くなった。最終的には、190gの機体に、130gの重りを載せ総重量320gで飛行することができた。この時フルパワーでも離陸に20mほどかかってしまったが、これは脚が重さでたわんで、滑走時の迎角が減ったためと、推力不足が原因であろう。脚を補強し、プロペラ変更により推力を上げるだけで、問題はなくなるであろう。これ以上の重りの追加は、離陸できなくなりそうなため行わなかった。

5. まとめ

体育館内で未経験者でも飛ばせる飛行ロボットのベースが完成した。模型飛行機が未経験の20歳の学生にこの飛行機を飛ばしてもらったところ、初回の1時間程度でジャンプ飛行と旋回ができ始め、2回目の1時間程度で自由に旋回し、壊すこともなく飛ばせるようになった。現時点で、本研究で製作したような大きなサイズで安定した飛行をする入門用室内模型飛行機は、市販されていない。一般的な模型飛行機の場合、墜落と修理を何ヶ月も何年も繰り返す、最終的に挫折してしまう人が多いことを考えると、本研究で製作した室内飛行機は、とても有用である。本質的な飛行技術を身に付けられる訳ではないが、この機体に制御用のワンチップマイコンを載せて、様々な実験を行うことができるであろう。

軽量のバッテリーを使うことで機体重量が160gになるため、ペイロードはそれと同程度の160gとなる。これは、様々なワンチップマイコン、センサー、通信チップなどを載せるには、十分な性能である。小型のカメラや小物などを搭載可能で、多目的に利用できるであろう。

今後は、ワンチップマイコンや各種センサーを機体に積み、体育館内にて自動で360度旋回、滑空、着陸等を行うための飛行制御を行う。この機体が、表2に示した目標とする飛行ロボットの性能に相当するのかを検証する必要があるであろう。また、運搬性向上のため、折り畳み式の主翼にすべく、現在その試作を行っている。次の機体では右翼と左翼がワンタッチで折り畳めるようになる予定である。本研究で設計した飛行ロボットは、本年度9月からの公開講座や、学生実験にて利用する。これらに関しては、次回報告したい。

謝辞

機体の製作や試験飛行を行うにあたり、夏休み中にも関わらず本科生の廣島健亮君、檜木泰宏君には、多大なる協力をしていただいたことに感謝します。なお、本研究はJSPS 科研費 26560106 の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 全日本学生室内飛行ロボットコンテスト
<http://indoor-flight.com/>
- 2) UIUC Airfoil Data Site(University of Illinois at Urbana-Champaign)
<http://m-selig.ae.illinois.edu/>